

0- 795028

На правах рукописи

**СИМАХИНА ЕВГЕНИЯ АНАТОЛЬЕВНА**



**ПРИЛОЖЕНИЕ ТЕОРИИ ЛИНЕЙНОЙ НЕИЗОЛИРОВАННОЙ  
АНТЕННЫ В НЕОДНОРОДНОЙ ПРОВОДЯЩЕЙ СРЕДЕ К НАЗЕМНО-  
СКВАЖИННОМУ ЗОНДИРОВАНИЮ**

Специальность: 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии  
Специальность: 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,  
веществ, материалов и изделий

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Казань 2012

Работа выполнена на кафедре Информационных технологий проектирования электронно-вычислительных средств Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,  
Даутов Осман Шакирович.

Официальные оппоненты: Рябова Наталья Владимировна,  
доктор физ.-мат. наук, доцент, Марийский  
государственный технический университет,  
зав. кафедрой Радиотехники и связи

Белашов Василий Юрьевич,  
доктор физ.-мат. наук, профессор, Казанский  
государственный энергетический университет,  
профессор кафедры Электрического транспорта.

Ведущая организация: Институт геологии и нефтегазовых технологий  
Казанского федерального университета, г. Казань

Защита состоится 25 мая 2012 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.079.04 в Казанском национальном исследовательском техническом университете им. А. Н. Туполева-КАИ по адресу: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 31/7.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Казанского национального исследовательского технического университета им. А. Н. Туполева-КАИ по адресу: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения, просим направлять по адресу: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10, КНИТУ-КАИ им. А. Н. Туполева, ученому секретарю диссертационного совета Д212.079.04.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
к.т.н., доцент

 С. С. Седов

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КФУ



0000807858

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Антенные системы находят всё более широкое применение в различных областях науки и техники. Из сравнительно новых сфер применения можно назвать подповерхностное зондирование, обеспечение связи и электромагнитного воздействия в неоднородной среде, разведка полезных ископаемых. Это естественно сопровождается существенным усложнением теории и техники антенн. В реальных неоднородных проводящих средах становятся ограниченными такие понятия как поле ближней зоны и поле излучения, диаграмма направленности, область источников. Антенна при этом возбуждает в окружающей среде не только поле, но и токи, которые в свою очередь являются источниками вторичного поля и резко снижают проникновение поля антенны в среду и, следовательно, её эффективность. По-видимому, первой обобщающей работой в этой области является книга Р. Кинга и Г. Смита, которая и дает представление о трудностях расчета и реализации таких антенн. Например, в геоэлектроразведке полезных ископаемых наибольшей трудностью является обеспечение с одной стороны достаточно глубокого проникновения зондирующего поля в геологический разрез и, с другой стороны, достоверная интерпретация результатов зондирования. Между тем, в настоящее время в связи с повышением спроса на углеводородные энергоносители возрастают требования к достоверности и качеству разведки залежей углеводородов (УВ), снижению затрат на эти цели. Электроразведка остается одним из перспективных методов, особенно в сочетании с другими методами, и продолжает успешно применяться в различных регионах.

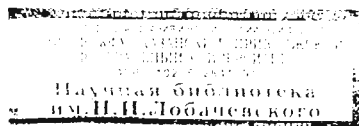
Несмотря на совершенствование программного обеспечения, широкое внедрение информационных технологий в процесс обработки и интерпретации результатов электромагнитного зондирования, многие проблемы остаются нерешенными. Еще до реализации какого-либо варианта метода требуется большой объем априорной информации: о структуре и электрофизических свойствах исследуемой среды, о требуемой мощности зондирующей системы для достижения достаточной глубины проникновения электрического тока с учётом конкретных условий каждого месторождения. В целях обеспечения регистрации сигнала, рассеянного слоем залежи, должны быть разработаны методические рекомендации по использованию измерительной аппаратуры необходимой чувствительности, расположению приемных датчиков, требуемому объему измерений. Ввиду значительной сложности подобных задач, поставленные вопросы остаются в значительной степени открытыми, несмотря на то, что электроразведка располагает в настоящее время самыми современными пакетами программ для моделирования электромагнитных процессов.

Причина такого положения, на наш взгляд, заключается в том, что разработаны преимущественно методы и программные средства решения прямых задач, когда по известному способу возбуждения, заданным электрофизическим параметрам и геометрии разреза рассчитывается

распределение поля. А для успешного ответа на поставленные выше вопросы необходимо чаще всего решение обратной задачи: по измеренным значениям поля на некотором доступном для этого множестве точек требуется восстановить геометрию разреза и электрофизические параметры его фрагментов, интересующие нас. Применение здесь программных средств решения прямых задач путем многократных численных экспериментов по проверке предполагаемой структуры разреза оказывается неэффективным ввиду существенной неоднородности, геометрической сложности геологических разрезов, их пространственной протяженности. Таким образом, задача повышения информативности наземно-скважинной электроразведки путем применения разработанных в теории антенн методов является актуальной.

Вместе с тем, в теории и технике антенн в настоящее время уделяется большое внимание методам решения обратных задач. Прежде всего, следует упомянуть теорию синтеза антенн по заданной диаграмме направленности, методы радиолокации и подповерхностного зондирования. В последнее время получены, в частности, новые численные методы решения электродинамических задач, более приспособленные для решения обратных задач, чем прямых. Одним из таких методов является метод объемных интегральных уравнений (МОИУ), предложенный еще в начале прошлого века зарубежными учёными: W. Esmarch, C.W. Oseen, W. Boethe, R. Lunblad. Впоследствии с появлением современной вычислительной техники интерес к этому методу возродился, и он был развит в работах Хижняка Н. А., Куликова С. П., Самохина А. Б., Даутова О. Ш.. В конце XX века метод стал применяться для моделирования статических геофизических полей в работах Кормильцева В. В., Ратушняка А. Н.. Этот метод хотя и требует больших затрат машинного времени и объема оперативной памяти при решении прямых задач, но обладает и уникальным свойством – представлением поля в виде суперпозиции полей, индуцируемых отдельными фрагментами рассеивающего тела. Применительно к задачам электроразведки он открывает возможность оценить вклад в электромагнитное поле каждого элемента разреза и тем самым существенно повысить информативность интерпретации результатов зондирования. При реализации метода наземно-скважинной электроразведки для оконтуривания залежи углеводородов часто используется подключённая к источнику питания обсадная колонна пробуренной ранее скважины, чем обеспечивается глубинность проникновения зондирующего поля. С точки зрения теории антенн в материальных средах обсадная колонна может рассматриваться как неизолированная линейная антенна в материальной среде. Положения этой теории могут использоваться для построения более точных моделей наземно-скважинного зондирования и соответственно повышения его информативности.

**Цель работы** заключается в повышении информативности низкочастотной электроразведки углеводородов с помощью применения теории антенн в материальных средах.



**Решаемые задачи** для достижения поставленной цели следующие:

1. Разработка электродинамической модели процесса частотного зондирования с использованием обсадной колонны.
2. Получение прямых оценок доли отклика от интересующего участка разреза, содержащего углеводороды, на фоне полного отражённого сигнала.
3. Исследование условий, при которых доля отклика от залежи при сопоставлении с общим откликом может быть четко выделена на его фоне.
4. Сопоставление с результатами практических измерений и их традиционной интерпретацией.
5. Выработка рекомендаций для практической реализации предлагаемой методики.

**Методы исследования** — численные методы прикладной электродинамики, методы теории антенн в материальных средах, методы подповерхностного зондирования.

**Научная новизна работы** состоит в следующем:

1. На основе метода объемных интегральных уравнений разработана адаптированная для целей электроразведки потенциальная модель возбуждения слоистого разреза с помощью обсадной колонны скважины.
2. Впервые получены прямые оценки доли отклика от отдельных фрагментов разреза и, в частности, от углеводородной залежи при частотном зондировании с использованием обсадной колонны.
3. Выявлены и исследованы области, где доля отклика от залежи сопоставима с общим откликом от разреза и может быть выявлена на его фоне.

**Достоверность и обоснованность** результатов обеспечивается квалифицированным применением апробированных методов прикладной электродинамики, сопоставлением полученных результатов с результатами эксперимента и с аналогичными результатами других авторов в смежных областях.

**Практическая значимость** работы заключается в том, что ее результаты позволяют значительно повысить информативность метода оконтуривания. Впервые появляется возможность анализировать зондирующую систему с учетом конкретного сочетания электрофизических параметров, геометрических особенностей разреза и углеводородной залежи; прогнозировать уровень отклика от залежи на фоне общего отклика и, тем самым, устанавливать границы применимости рассматриваемого метода в каждом конкретном случае. Таким образом, с помощью метода пространственной фильтрации можно выявить зоны измерений на дневной поверхности, обеспечивающие наибольшую чувствительность; определить требуемую дискретизацию и объем измерений, необходимый для обеспечения максимально эффективного прогноза оконтуривания.

### **Научные положения, выносимые на защиту**

1. Потенциальная модель возбуждения разреза обсадной колонной.
2. Методика расчёта распределения поля в слоистом разрезе с учётом электрофизических параметров углеводородной залежи и вмещающей среды, а также с учётом изменения этих параметров вследствие диффузии УВ.
3. Методика оценки доли отклика от залежи методом пространственной фильтрации.
4. Результаты численных экспериментов с применением потенциальной модели и сопоставление с альтернативным методом интерпретации (Wet Line Finding, «КруКо»).
5. Рекомендации по выбору зоны измерений на дневной поверхности, дискретности и объёму.

**Личный вклад автора.** Автор самостоятельно разработал ряд математических моделей для рассматриваемых электроразведочных методов, провёл все численные эксперименты, провёл обзор и анализ литературы по экспериментальным работам других авторов, сделал сравнение результатов и сформулировал основные выводы по работе.

### **Практическое использование результатов работы**

Результаты работы использованы в методике наземно-скважинных электроразведочных работ НПУ ТНГ «Казаньгеофизика». В 2009 году получен грант молодёжного научного конкурса «У.М.Н.И.К.» (Участник молодёжного научно-инновационного конкурса) за проект, созданный на основе материалов диссертационной работы. На развитие данного проекта в 2012 году получен грант по программе «СТАРТ» финансирования инновационных проектов, находящихся на начальной стадии развития. Полученные в диссертационной работе результаты рекомендуются для использования в КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева в курсах дисциплин: «Антенны и распространение радиоволн», «Физические основы защиты информации», «Теоретические основы вычислительной диагностики», «Электромагнитная совместимость»; в КФУ в курсах дисциплин: «Теория поля», «Электроразведка», «Геофизические методы исследований и интерпретация геофизических данных».

### **Апробация работы**

Основные положения диссертационной работы докладывались на международных и всероссийских информационно-технологических и геологических семинарах и конференциях в городах: Казань, Москва, Курск, Нижний Новгород; опубликованы статьи в журнале «Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева», рекомендованном ВАК.

Основные результаты диссертационной работы были использованы для составления отчётов по НИР для НПУ ТНГ Казаньгеофизика на тему: «Моделирование процессов наземно-скважинного зондирования для оконтуривания залежей углеводородов» и НИОКР на тему: «Создание

программных средств первичной обработки и интерпретации данных дифференциально-нормированного метода электроразведки (ДНМЭ)».

Результаты диссертационной работы в течение двух лет докладывались в отчётах по гранту инновационного конкурса У.М.Н.И.К., организованного государственным фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере. По гранту данного фонда в соавторстве с Даутовым Османом Шакировичем проведены НИР и сданы отчёты на темы: «Разработка электродинамической модели распределения поля в слоистой среде для реализации метода наземно-скважинной электроразведки»; «Разработка способа повышения информативности оконтуривания нефти за счёт внедрения основ фазового метода вызванной поляризации в моделирование процессов зондирования слоистой среды».

### **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано 13 научных трудов, в том числе 2 статьи в научном журнале «Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева», рекомендованном ВАК, 5 статей и 6 тезисов докладов в сборниках научных трудов международных и всероссийских конференций и семинаров.

### **Соответствие диссертации научной специальности**

Диссертационная работа соответствует специальности 05.12.07, а именно п. 2 паспорта специальности, так как для решения задачи возбуждения глубокозалегающей нефти требуется освоение нового частотного диапазона (области инфранизких частот); п. 5 паспорта специальности, поскольку в основу разработанной модели зондирования положено рациональное и экономически обоснованное использование уже пробуренной и обсаженной скважины в качестве антенны для возбуждения слоистой среды в электроразведочных целях; п. 8 паспорта специальности, так как диссертация посвящена вопросам применения обсадной колонны в новом качестве – в качестве линейной неизолированной антенны с уникальными характеристиками и используется как передающая антенна для возбуждения слоистого полупространства. Диссертационная работа соответствует также специальности 05.11.13 по п.1 областей исследования, так как посвящена научному обоснованию и усовершенствованию метода аналитического и неразрушающего контроля элемента природной среды – геологического разреза путем зондирования обсадной колонной скважины.

### **Структура и объем диссертационной работы**

Общий объем работы составляет 171 страницу, в том числе 69 рисунков и 5 таблиц. Список использованной литературы включает 114 наименований.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, списка условных обозначений и сокращений, иллюстративного материала в приложениях.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении проводится обоснование актуальности темы диссертации, сформулированы цель и основные решаемые задачи, показана практическая значимость и научная новизна, представлены защищаемые положения и краткое содержание работы.

В первой главе приведены примеры использования антенн в материальных средах для решения прикладных задач при разных случаях расположения возбуждающей антенны. Приводится формулировка задачи оконтуривания залежи, которая фактически представляет собой обратную задачу электродинамики. Для её решения необходимо сначала построить математическую модель, позволяющую решать прямую задачу. Описаны варианты методов решения прямой задачи, приведены построенные аналитические модели возбуждения однородного полупространства. Дан обзор численных методов и существующего программного обеспечения для решения обратной задачи. Делается вывод, что не разработаны электродинамические модели и программные пакеты на их основе, которые позволяли бы выделять долю сигнала от определённого фрагмента геологического разреза в общем сигнале, измеряемом на поверхности земли. Описаны возможности и преимущества использования для этих целей метода объемных интегральных уравнений (МОИУ).

Во второй главе приведён сравнительный анализ электроразведочных методов. Делается вывод о перспективности разработки моделей для метода наземно-скважинной электроразведки с использованием обсадной колонны скважины (ОКС) в качестве длинной линейной возбуждающей антенны в материальной среде. Разрабатываются математические модели для применяемых на практике двух схем зондирования, условно названных токовой и потенциальной. На данном этапе рассматривается случай помещения зондирующей антенны в однородное полупространство. Токовый метод заключается в возбуждении обсадной колонны электрическим током, который поступает на электроды, приведённые в электрический контакт с верхним концом трубы на поверхности земли и с нижним концом на глубине 1,6 км. По методу зеркальных изображений тогда можно определить напряжённость полного электрического поля в точке наблюдения как суперпозицию полей: поля, создаваемого вертикальной электрической линией и поля её изображения:

$$\vec{E}_{\text{полн}} = \vec{E}_0 + \vec{E}' \quad (1)$$

где напряжённость поля, создаваемого в среде заряженной обсадной колонной:

$$\vec{E}_0 = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon} \cdot \int_0^l \frac{3 \cdot (\vec{r}_0 \cdot \vec{p}) \cdot \vec{r}_0 - \vec{p}}{r^3} dl \quad (2)$$

а поле изображения возбуждённой обсадной колонны:

$$\vec{E}' = -\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon + \varepsilon_0} \cdot \int_0^l \frac{3 \cdot (\vec{r}'_0 \cdot \vec{p}) \cdot \vec{r}'_0 - \vec{p}}{r'^3} dl' \quad (3)$$

где дипольный момент определяется:



$$\vec{p} = \frac{I \cdot \vec{z}}{l \cdot \omega} \quad (4)$$

Потенциальный способ возбуждения заключается в применении двухэлектродной схемы зондирования, одним из электродов которой ( $A$ ) является обсадная колонна скважины, а вторым ( $B$ ) – является неглубоко заземленный металлический электрод. С использованием метода зеркальных изображений можно записать потенциал равномерно заряженной колонны:

$$\varphi_z = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon} \cdot \left[ \int_0^L \frac{\tau \cdot e^{-k \cdot r}}{r} dz_1 + \int_0^L \frac{\tau_{uz} \cdot e^{-k \cdot r_{uz}}}{r_{uz}} dz_1 \right] \quad (5)$$

где линейный заряд изображения колонны:

$$\tau_{uz} = \tau \cdot \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon + \varepsilon_0} \quad (6)$$

Тогда полный потенциал в точке наблюдения складывается из потенциала равномерно заряженной колонны и потенциала, создаваемого локальным электродом.

Напряжённость возбуждающего электрического поля в точке наблюдения представлено в виде суперпозиции поля, создаваемого зарядами, распределенными по поверхности колонны и полем точечного заряда второго электрода (поле симметрично относительно оси  $OZ$ ):

$$\vec{E}_0 = -grad\varphi \quad (7)$$

При такой постановке задачи её решение можно получить аналитически, формулы для цилиндрических компонент приведены в работе.

Приводятся результаты численных экспериментов для обеих моделей (рис. 1, рис. 2).

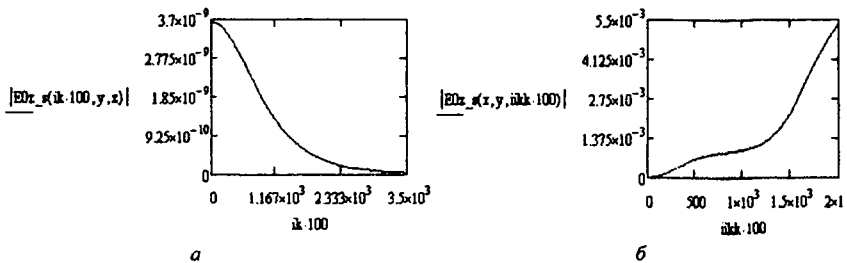


Рис. 1.  $a$  –  $z$ -компонента напряжённости полного поля в точках ( $x=0..3500$ ,  $y=500$ ,  $z=0..1$ ),  
 $b$  – в точках ( $x=500$ ,  $y=500$ ,  $z=0..2000$ ) для токового метода возбуждения

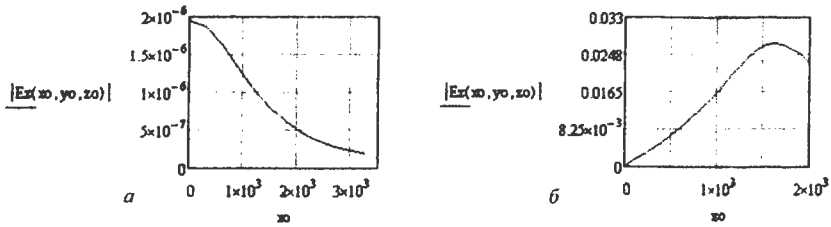


Рис. 2. а – z-компонента напряжённости полного поля в точках ( $x=0..3500$ ,  $y=500$ ,  $z=0,1$ ), б – в точках ( $x=500$ ,  $y=500$ ,  $z=0..2000$ ) для потенциального метода возбуждения

На основе полученных результатов обоснованы преимущества потенциальной модели перед токовой моделью. Приводятся рекомендации по применимости токового – ТМВ (для профилирования вблизи колонны) и потенциального – ПМВ методов возбуждения (для возбуждения слоя и его оконтуривания). Делается вывод о сравнительной простоте и адекватности построенных моделей.

Для подтверждения соответствия порядков амплитуды поля при одинаковых начальных данных проведено сравнение результатов, полученных в ходе численных экспериментов для токовой модели с результатами измерений амплитуды поля на поверхности (рис. 3).

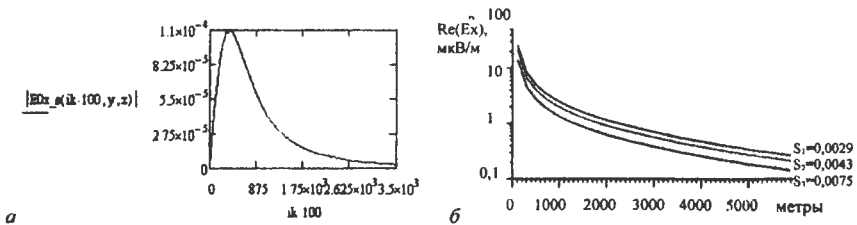


Рис. 3. а – распределение x-компоненты напряжённости полного поля в точках ( $x=0..3500$ ,  $y=500$ ,  $z=0,1$ ) для токового метода возбуждения (численный эксперимент), б – распределение измеренной амплитуды x-компоненты поля по профилю наблюдения на поверхности

Косвенное подтверждение правильности данного вывода содержится в работах Могилатова В.С. и Гендельмана А.М., где исследован предельный случай, когда поле ищется как поле источника, заземленного на колонну, что соответствует отнесению второго электрода на бесконечность. Авторами показано значительное проникновение поля в исследуемые горизонты (при подключении источника питания к нижнему концу колонны). В дальнейшем в работе используется только ПМВ и применяется подход, использованный Кингом и Смитом для моделирования тонкой неизолированной антенны в материальной среде с потерями. Поскольку прямой перенос этой методики для рассматриваемой в настоящей работе задачи невозможен, потребовалась её

модификации в сочетании с методом изображений. В работе получено скалярное интегральное уравнение относительно линейной плотности заряда.

Для приведения ПМВ к более строгому виду разработана модель распределения заряда по возбуждающей антенне – обсадной колонне (ранее при моделировании упрощенно принималось равномерное распределение заряда по всей длине колонны). Сопротивление колонны при длине 1,6 км составляет около 20 Ом (частота возбуждающего тока  $f=0,488$  Гц). Ввиду высокой проводимости колонны по сравнению с проводимостью разреза можно полагать поверхность колонны эквипотенциальной, тогда потенциал на колонне:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\sigma(\vec{r}_i) d\vec{r}_i}{R} \quad (8)$$

Тогда задача расчета поля в однородном полупространстве сводится к нахождению распределения линейной плотности заряда на колонне с помощью неоднородного интегрального уравнения Фредгольма 2-го рода:

$$Y(x) - \lambda \cdot \int_C K(x, y) \cdot Y(y) dy = f(x) \quad (9)$$

где  $f(x) \neq 0$  – известная измеримая функция (в нашем случае потенциал на колонне),  $Y(x)$  – искомая функция плотности распределения заряда,  $K(x, y)$  – полярное ядро, учитывающее граничные условия на поверхности раздела.

Приведенное выше уравнение решается с помощью метода Крылова – Боголюбова, сводящего задачу к системе линейных алгебраических уравнений:

$$\sum_{i=1}^N \int_{\Delta z_i} K(x, y) \cdot Y(x_i) dy = \sum_{i=1}^N f(x_i) \quad (10)$$

где неизвестная функция аппроксимируется кусочно-постоянной функцией.

Разобьем колонну на элементарные цилиндры малой высоты:  $\Delta z_l = L/n$  с

координатами центров  $z_{l,j} = \frac{\Delta z_l}{2} + \Delta z_l(j-1)$ ,  $j = \overline{1, n}$ . В пределах каждого элементарного цилиндра плотность распределения заряда принимаем постоянной и линейной:

$$\tau_i = \tau \cdot (i \cdot \Delta z_l - \frac{\Delta z_l}{2}) \quad (11)$$

Помещая последовательно точку наблюдения в центр каждой цилиндрической ячейки, получим систему алгебраических уравнений относительно плотностей зарядов:

$$\tau = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)' \quad (12)$$

$$\alpha \cdot \tau = \varphi \quad (13)$$

где  $\varphi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n)'$  – значения потенциалов ячеек ( $\varphi_i = U/2$ ),  $U$  – напряжение на электродах. Элементы матрицы потенциальных коэффициентов  $\alpha = \{\alpha_{i,j}\}$  имеют следующее представление:

$$\alpha_{ij} = \begin{cases} \frac{\Delta z_l}{4\pi\epsilon} \left( \frac{1}{|z_i - z_l|} - \frac{1}{\sqrt{\rho_s^2 + z_l^2}} \right) & (i \neq j) \\ \frac{1}{4\pi\epsilon} \ln \left[ \frac{\sqrt{\left(\frac{\Delta z_l}{2}\right)^2 + a^2} + \frac{\Delta z_l}{2}}{\sqrt{\left(\frac{\Delta z_l}{2}\right)^2 + a^2} - \frac{\Delta z_l}{2}} \right] & (i = j) \end{cases} \quad (14)$$

$i = (\overline{1, m})$  – индекс точки наблюдения,  $j = (\overline{1, n})$  – индекс точки интегрирования.

При  $i \neq j$  учитываем влияние удалённых источников, поэтому по сравнению с расстоянием до второго электрода радиусом колонны можно пренебречь. В данном случае функция, являющаяся ядром интегрального уравнения, меняется медленно, то её можно вынести за знак интеграла:

$$\frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \sum_{i=1}^N r_i \cdot \left( \frac{1}{|z_i - z_l|} \cdot \int_{(i-1)\Delta z_l}^{i\Delta z_l} dz_l - \frac{1}{\sqrt{\rho_s^2 + z_l^2}} \cdot \int_{(i-1)\Delta z_l}^{i\Delta z_l} dz_l \right) = U(z_j) \quad (15)$$

При диагональных элементах матрицы  $i=j$  учитываем влияние только самой колонны (влияние второго электрода пренебрежимо мало):

$$\frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \sum_{i=1}^N r_i \cdot \left( \int_{(i-1)\Delta z_l}^{i\Delta z_l} \frac{dz_l}{\sqrt{a^2 + (z_i - z_l)^2}} \right) = U(z_j) \quad (16)$$

В этом случае функция, являющаяся ядром интегрального уравнения, быстро меняется, тогда интегрируем по каждому элементарному столбцу:

$$\begin{aligned} & \int_{(i-1)\Delta z_l}^{i\Delta z_l} \frac{dz_l}{\sqrt{a^2 + (z_i - z_l)^2}} = \ln \left| (z_i - z_l)_j + \sqrt{a^2 + (z_i - z_l)_j^2} \right| \Big|_{(i-1)\Delta z_l}^{i\Delta z_l} = \\ & = \ln \left| (i-1)\Delta z_l - j\Delta z_l + \frac{\Delta z_l}{2} + \sqrt{a^2 + \left(\frac{\Delta z_l}{2}\right)^2} \right| - \ln \left| (i-1)\Delta z_l - j\Delta z_l + \frac{\Delta z_l}{2} + \sqrt{a^2 + \left(\frac{\Delta z_l}{2}\right)^2} \right| = \ln \left( \frac{\frac{\Delta z_l}{2} + \sqrt{a^2 + \left(\frac{\Delta z_l}{2}\right)^2}}{-\frac{\Delta z_l}{2} + \sqrt{a^2 + \left(\frac{\Delta z_l}{2}\right)^2}} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

Результаты численного эксперимента по сравнению распределения плотности заряда на колонне для модели с учётом и без учёта метода зеркальных изображений (МЗИ) приведены на рис. 4.

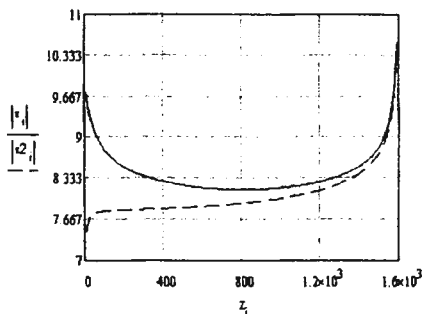


Рис. 4. Распределение линейной плотности заряда по колонне без МЗИ ( $\tau$ ) и с МЗИ ( $\tau_2$ ) при  $f=0,488$  Гц,  $I=28$  А,  $U=600$  В,  $\rho_2=3200$  м,  $a=0,05$  м,  $L=1600$  м,  $n=100$ , электрофизические свойства полупространства:  $\epsilon=18,5$ ,  $\sigma=1/15$  См/м.

В третьей главе в качестве возбуждаемой среды выбрана одномерно неоднородная модель в виде горизонтально-слоистой структуры (ГСС), характерной для районов поисковых работ на нефть и газ. Слои характеризуются параметрами  $\sigma$  и  $\epsilon_r$  ( $\mu_r=1$ ). Приведена методика усреднения электрофизических параметров по слоям:

1. Общая диэлектрическая проницаемость комплекса пород (неупорядоченной смеси отдельных компонент) определяется:

$$\lg \epsilon_r^* = \sum_{i=1}^n y_i \cdot \lg \epsilon_{ri} \quad (18)$$

где  $\epsilon_r^*$  — «эффективная» относительная диэлектрическая проницаемость смешанного диэлектрика,  $\epsilon_{ri}$  — диэлектрические проницаемости отдельных компонент смеси;  $y_i$  — их объёмные концентрации, удовлетворяющие

$$\sum_{i=1}^n y_i = 1$$

2. Представим слоистый геологический разрез, состоящий из 7 комплексов пород, в виде набора горизонтальных слоёв диэлектриков, просвечиваемых вдоль радиальной составляющей электромагнитного поля, как параллельное соединение ёмкостей (рис. 5):

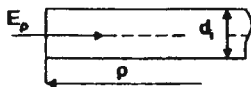


Рис. 5. Представление набора горизонтальных слоёв диэлектриков как параллельного соединения ёмкостей

$$C_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^N \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{ri}^* \cdot d_i}{\rho} = \frac{\epsilon_0}{\rho} \cdot \sum_{i=1}^N \epsilon_{ri}^* \cdot d_i \quad (19)$$

с другой стороны

$$C_{\text{пр}} = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{\text{пр}}^* \cdot D}{\rho} \quad (20)$$

приравнивая правые части, получаем результирующую относительную диэлектрическую проницаемость вмещающей залежь среды:

$$\varepsilon_{\text{эф}} = \frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon_i^* \cdot d_i}{D} \quad (21)$$

где  $N$  – число горизонтальных слоёв,  $D = \sum_{i=1}^N d_i$  – суммарная мощность осадочного чехла,  $d_i$  – мощность  $i$ -того слоя,  $\varepsilon_i^*$  – определяемая соотношением (18) усреднённая относительная диэлектрическая проницаемость  $i$ -того слоя, который представляет собой смешанный диэлектрик.

3. Пусть в комплексе вещества находятся в равных объёмных концентрациях, тогда из  $\sum_{i=1}^n y_i = 1$  следует, что  $y_i = 1/n$ . Тогда «эффективная» относительная диэлектрическая проницаемость смешанного диэлектрика:

$$\varepsilon_r = \left( \prod_{i=1}^n \varepsilon_i \right)^{1/n} \quad (22)$$

Далее разработана модель растекания электрического тока от возбуждающей линейной антенны по слоистой среде. Поверхность обсадной колонны скважины считается эквипотенциальной. Плотность тока в пределах  $i$ -го слоя:  $j_i = \sigma_i \cdot E$ . Выражение для силы тока, втекающего в  $i$ -ый слой:

$I_i = j_i \cdot d_i \cdot 2 \cdot \pi \cdot a$ , где  $a$  – радиус колонны. Полный ток, втекающий в колонну:

$$I_0 = \sum_{i=1}^N I_i = \sum_{i=1}^N j_i \cdot d_i \cdot 2 \cdot \pi \cdot a = \sum_{i=1}^N \sigma_i \cdot E \cdot d_i \cdot 2 \cdot \pi \cdot a = E \cdot 2 \cdot \pi \cdot a \cdot \sum_{i=1}^N \sigma_i \cdot d_i \quad (23)$$

Напряжённость поля на колонне:

$$E_p|_{\rho=a} = \frac{I_0}{2 \cdot \pi \cdot a \cdot \sum_{i=1}^N \sigma_i \cdot d_i} \quad (24)$$

С другой стороны напряжённость электрического поля в точке наблюдения:  $\vec{E} = \vec{\rho}_0 \cdot \frac{c}{\rho}$ , а напряжённость поля на колонне:  $E_p|_{\rho=a} = \frac{c}{a}$ .

Получим:  $\frac{c}{a} = \frac{I_0}{2 \cdot \pi \cdot a \cdot \sum_{i=1}^N \sigma_i \cdot d_i}$ , откуда  $c = \frac{I_0}{2 \cdot \pi \cdot \sum_{i=1}^N \sigma_i \cdot d_i}$  и напряжённость поля:

$$\vec{E} = \vec{\rho}_0 \cdot \frac{I_0}{2 \cdot \pi \cdot \sum_{i=1}^N \sigma_i \cdot d_i} \cdot \frac{1}{\rho} \quad (25)$$

Плотность тока, стекающего с колонны в слоистую среду, пропорциональна напряжённости электрического поля и проводимости среды:  $j_n = \sigma_n \cdot E$ , где  $N$  – порядковый номер комплекса.

Численный эксперимент проведён на основании начальных данных о структуре ГСС и уровне возбуждающего сигнала (НПУ ТНГ Казаньгеофизика).

При одинаковых исходных данных проведено сравнение результатов численного эксперимента с результатами полевых исследований (рис. 6).

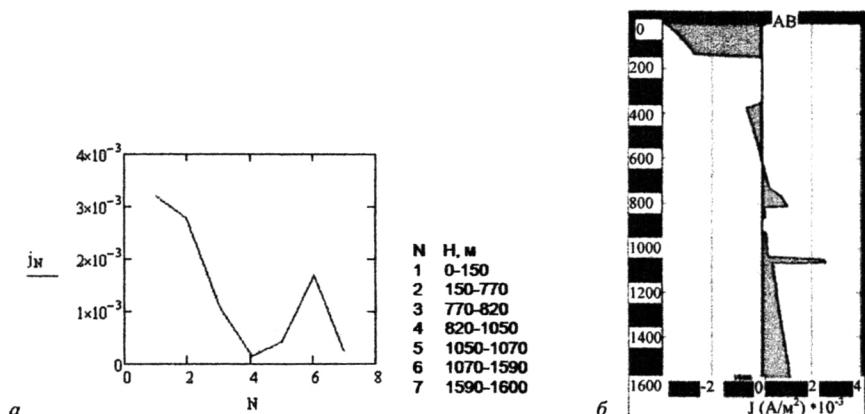


Рис. 6. а – график растекания плотности электрического тока по ГСС, б – диаграмма распределения плотности электрического тока (окно WLF) при  $I=1 \text{ A}$

Численный эксперимент проведён на основании начальных данных о структуре ГСС и уровне возбуждающего сигнала (НПУ ТНГ Казаньгеофизика). При одинаковых исходных данных проведено сравнение результатов численного эксперимента с результатами полевых исследований. Рассмотрены характерные области сравнения: в первом комплексе пород ( $N=1$ ) на рис. 6 а) также отмечается максимально высокий уровень растекания плотности электрического тока  $j_1 \approx 3,3 \cdot 10^{-3} \text{ A/m}^2$ ; по слоям комплекса 4 ( $N=4$ ) ток почти не растекается  $j_4 \approx 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ A/m}^2$ ; а в комплекс 6 (где находится слой залежи нефти) попадает уровень плотности тока  $j_6$  около  $2 \cdot 10^{-3} \text{ A/m}^2$ . Сделан вывод, что данная модель растекания тока в слоистой среде даёт правильное решение задачи, т.к. результаты моделирования хорошо согласуются с результатами экспериментальных работ, наблюдается расхождение в десятых долях  $\text{mA/m}^2$ .

В третьей главе разработана математическая модель ПМВ ГСС в двух вариантах с использованием метода пространственной фильтрации отклика. Под пространственной фильтрацией отклика понимается возможность с помощью МОИУ представить напряжённость полного поля на поверхности в виде суммы напряжённостей полей от вмещающей среды и обусловленного наличием залежи нефти. Появляется возможность сопоставления уровня полного отклика от разреза и доли отклика от залежи при разных положениях зоны измерения, т.е. можно выявить зоны с максимальным уровнем напряжённости дополнительного поля от залежи.

В первом приближении в модели не учитывалась диффузия УВ во вмещающую среду. В масштабе размеров зондирующей установки и

исследуемого объёма полупространства форма слоя залежи УВ аппроксимируется тонким диском постоянной толщины и радиуса. Напряжённость полного поля на поверхности:

$$\vec{E}_{\text{полное}} = \vec{E}_{\text{внешнее}} + \vec{E}_{\text{дополн.}} \quad (26)$$

$$\vec{E}_{\text{доп.}} = \frac{1}{i \cdot \omega \cdot \epsilon} \cdot [\text{grad div} + k^2] \cdot \int_V \vec{j} \cdot G(R) dV \quad (27)$$

где  $G(R) = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot R}$  - функция Грина,  $\vec{j} = i \cdot \omega \cdot (\epsilon_t - \epsilon) \cdot \vec{E}_t$  - ток поляризации, то:

$$\vec{E}_{\text{доп.}} = [\text{grad div} + k^2] \cdot \int_V \left( \frac{\epsilon_t}{\epsilon} - 1 \right) \cdot \vec{E}_t \cdot G(R) dV \quad (28)$$

Тангенциальная и нормальная компоненты поля внутри слоя залежи определяются с учётом граничных условий:

$$E_{1t} = E_{0t}, \quad E_{1r} = \frac{\epsilon}{\epsilon_t} \cdot E_{0r}, \quad (29)$$

Проекции вектора напряжённости дополнительного электрического поля на оси координат:

$$E_x = \int_V \left\{ \frac{1}{R} \cdot \left[ \frac{\partial G}{\partial R} \cdot p_x + \frac{\partial}{\partial R} \left( \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial G}{\partial R} \right) \cdot (x - x_v) \cdot (p_x \cdot (x - x_v) + p_y \cdot (y - y_v) + p_z \cdot (z - z_v)) \right] + \right. \\ \left. + k^2 \cdot p_x \cdot G(R) \right\} dV \quad (30)$$

$$E_y = \int_V \left\{ \frac{1}{R} \cdot \left[ \frac{\partial G}{\partial R} \cdot p_y + \frac{\partial}{\partial R} \left( \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial G}{\partial R} \right) \cdot (y - y_v) \cdot (p_x \cdot (x - x_v) + p_y \cdot (y - y_v) + p_z \cdot (z - z_v)) \right] + \right. \\ \left. + k^2 \cdot p_y \cdot G(R) \right\} dV \quad (31)$$

$$E_z = \int_V \left\{ \frac{1}{R} \cdot \left[ \frac{\partial G}{\partial R} \cdot p_z + \frac{\partial}{\partial R} \left( \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial G}{\partial R} \right) \cdot (z - z_v) \cdot (p_x \cdot (x - x_v) + p_y \cdot (y - y_v) + p_z \cdot (z - z_v)) \right] + \right. \\ \left. + k^2 \cdot p_z \cdot G(R) \right\} dV \quad (32)$$

Подробные выводы приводятся частично в тексте диссертации и вынесены в приложения. По результатам численного эксперимента отмечался очень низкий уровень напряжённости дополнительного поля рассеяния от залежи (порядка  $\sim 10^{-10}$  В/м). В этом случае уровень напряжённости внешнего зондирующего поля на 8-12 порядков превышает уровень напряжённости дополнительного поля. Этот результат является неудовлетворительным при интерпретации электроразведочных данных. Поэтому далее разработан второй вариант модели ПМВ ГСС с учётом диффузии УВ на основе построенной электрофизической модели диффузии мигрирующих во вмещающую среду углеводородов:



Концентрация мигрирующих углеводородов подчиняется зависимости:

$$\alpha(z, t) = \frac{\theta(t)}{2 \cdot \sqrt{D} \cdot \sqrt{\pi \cdot t}} \cdot \int_{-z/2}^{z/2} \frac{|z-z_1|^2}{4D} dz_1 \quad (33)$$

Соответственно, по такому же закону будет изменяться диэлектрическая проницаемость «столба» пород, вмещающего слой углеводородной залежи:

$$\varepsilon_d(z) = \begin{cases} \varepsilon + \frac{\varepsilon_c - \varepsilon}{\sqrt{\pi \cdot \alpha_z}} \cdot \exp\left(-\frac{(z_c - z)^2}{\alpha_z}\right) & \text{if } z \leq z_c; \\ \varepsilon_c & \text{if } z_c \leq z \leq z_c + d_c; \\ \varepsilon + \frac{\varepsilon_c - \varepsilon}{\sqrt{\pi \cdot \alpha_z}} \cdot \exp\left(-\frac{(z - z_c - d_c)^2}{\alpha_z}\right) & \text{if } z > z_c + d_c. \end{cases} \quad (34)$$

Напряжённость полного поля для ПМВ с учётом диффузии углеводородов:

$$\vec{E}_v = \vec{E}_0 + \vec{E}_r \quad (35)$$

где напряжённость поля рассеяния:

$$\vec{E}_r = \vec{E}_{0\_diff,1} + \vec{E}_{i\_diff} + \vec{E}_{0\_diff,2} \quad (36)$$

Напряжённость вмещающей среды (над и под слоем залежи):

$$\vec{E}_{0\_diff,1(2)} = [\text{grad div} + k^2] \cdot \int_V (\varepsilon_d(z) - \varepsilon) \cdot \vec{E}_0(\rho, z) \cdot G(R) dV \quad (37)$$

Напряжённость поля внутри слоя:

$$\vec{E}_{i\_diff} = [\text{grad div} + k^2] \cdot \int_V (\varepsilon_d(z) - \varepsilon) \cdot \vec{E}_i(\rho, z) \cdot G(R) dV \quad (38)$$

В формулах (37), (38) в качестве  $\varepsilon_d(z)$  берётся соответствующее значение диэлектрической проницаемости из (34).

Приведено подробное исследование результатов численных экспериментов для различных значений времени протекания процесса диффузии и коэффициента диффузии (рис. 7), т.е. применяемый метод открывает перспективы оценивать возраст месторождений и интенсивность протекания процесса диффузии. Важным обстоятельством является то, что разработанная модель позволяет по результатам расчётов обозначить конкретные области, где уровень дополнительного поля не ниже полного поля более чем на 2-2,5 порядка, т.е. сигнал от залежи УВ можно зарегистрировать с помощью имеющейся измерительной аппаратуры:

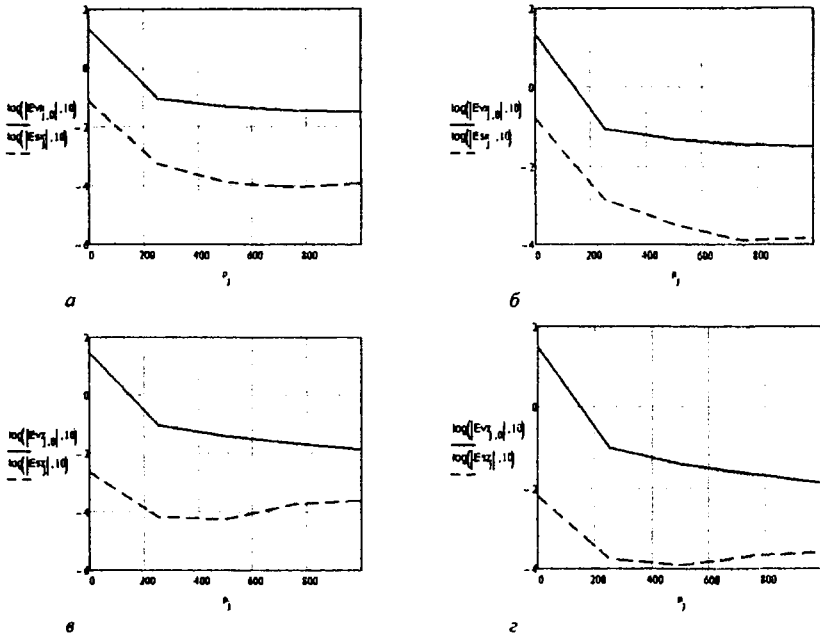


Рис. 7. Сравнение в логарифмическом масштабе уровней  $a$ ,  $b$  –  $x$ -проекций  $a$ ,  $z$  –  $z$ -проекций напряженностей поля рассеяния и полного поля при  $a$ ,  $в$  –  $t=1$  млн. лет,  $D=10^{-6}$  и при  $б$ ,  $г$  –  $t=20$  млн. лет,  $D=10^{-9}$

В четвертой главе рассмотрено приложение разработанной ПМВ к одному из наиболее часто применяющихся на практике электроразведочных методов – методу вызванной поляризации (ВП). Приведён обзор модификаций метода ВП. Обоснован выбор фазового частотного варианта метода как наиболее простого и обеспечивающего высокую помехозащищённость. В фазовом варианте метода ВП вычисляют относительный фазовый параметр:

$$\Delta\varphi = \frac{\omega_{\text{выс}} \cdot \varphi(\omega_{\text{низ}}) - \omega_{\text{низ}} \cdot \varphi(\omega_{\text{выс}})}{\omega_{\text{выс}} - \omega_{\text{низ}}}$$

или, если рассматриваются 1-ая и 3-я гармоники сигнала, то  $\omega_{\text{выс}} = 3 \cdot \omega_{\text{низ}}$ :

$$\Delta\varphi = \frac{3 \cdot \omega_{\text{низ}} \cdot \varphi(\omega_{\text{низ}}) - \omega_{\text{низ}} \cdot \varphi(3 \cdot \omega_{\text{низ}})}{2 \cdot \omega_{\text{низ}}} = \frac{3 \cdot \varphi_1 - \varphi_3}{2} \quad (39)$$

где  $\omega_{\text{низ}}$  и  $\omega_{\text{выс}}$  – условно низкая и высокая частоты, а  $\varphi(\omega_{\text{низ}})$  и  $\varphi(\omega_{\text{выс}})$  – фазы основной гармоники сигнала на низкой и высокой частотах.

Двухчастотный фазовый параметр может быть представлен в виде:

$$\Delta\varphi = \frac{3 \cdot E_{\nu\varphi}(\omega) - E_{\nu\varphi}(3 \cdot \omega)}{2} \quad (40)$$

В ходе численного эксперимента по расчёту относительного фазового параметра, отмечены области аномальных изменений графика функции  $\Delta\varphi$  (по фазам поля рассеяния) вблизи границы слоя залежи (рис. 8).

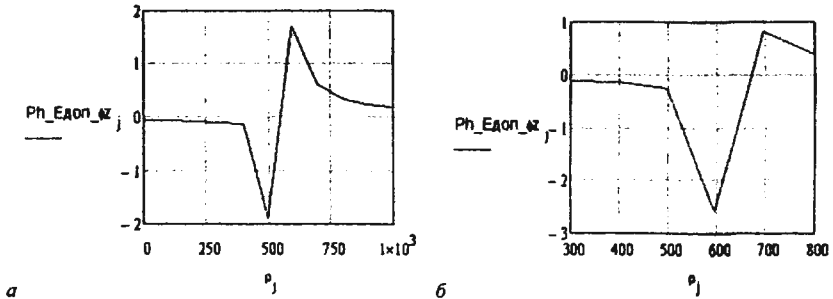


Рис. 8. Распределения двухчастотного фазового параметра, рассчитанного по фазам z-компонент дополнительного поля на частотах  $f=0,488$  Гц и  $3f=1,464$  Гц при радиусах слоя углеводородов  $a - \rho_c = 500$  м,  $b - \rho_c = 700$  м

Также выявлено, что при определённом значении частоты возбуждения аномальные изменения графика функции  $\Delta\varphi$  могут сильнее проявляться (рис. 9), поэтому частотный диапазон регистрации и анализа поля может быть выбран на этапе проектирования работ с учётом результатов моделирования.

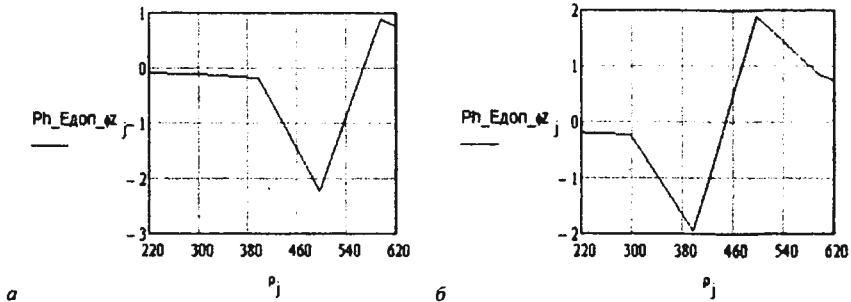


Рис. 9. Распределения двухчастотного фазового параметра, рассчитанного по фазам z-компонент дополнительного поля (радиус слоя залежи  $\rho_c = 300$  м) на частотах  $a - f=0,488$  Гц и  $3f=1,464$  Гц,  $b - f=1$  Гц и  $3f=3$  Гц

Численный эксперимент был проведён с использованием априорной информации из отчёта НПУ Казаньгеофизика, с результатами их измерений  $\Delta\varphi$  также было проведено сравнение.

Поскольку ни в модели, заложенной компанией «КруКо» в программный пакет WLF, ни в разработанной нами в ПМВ тонкого слоя без учёта диффузии УВ по расчётам  $\Delta\varphi$  для полного поля не отмечается отклонений этого параметра вблизи ожидаемых значений координат границы слоя залежи на фоне ошибок измерения, а аномальные отклонения  $\Delta\varphi$  наблюдается на

практике, то они объясняются моделью диффузии, разработанной нами в третьей главе.

**В заключении** сформулированы основные выводы и результаты, полученные в настоящей диссертационной работе, приведены методические рекомендации по практическому внедрению новых разработок и исследований.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Предложен подход к рассмотрению ОКС в качестве излучающей антенны в материальной среде. Исследованы разные схемы возбуждения среды с помощью ОКС, для которых получены распределения полей на поверхности.

2. Предложен новый подход к обработке информации и численному моделированию распределений амплитудных и фазовых составляющих полей, основанный на пространственной фильтрации отклика.

3. Построены новые модели для исследования возбуждения ГСС токовым и потенциальным методами. Разработаны разновидности ПМВ без учёта и с учётом диффузии УВ для расчёта амплитудных и фазовых составляющих напряжённостей дополнительного и полного полей. Показано, что максимально равномерное распределение и высокий уровень возбуждающего поля достигается при ПМВ.

4. Новые подходы к моделированию процессов возбуждения материальной среды антенной позволяют на практике выработать методические рекомендации по использованию электроразведочной аппаратуры с требуемой точностью измерений амплитуды и фазы поля.

5. В построенной ПМВ с учётом диффузии УВ прослеживается взаимосвязь уровня отклика, обусловленного наличием слоя УВ, со временем формирования залежи и интенсивностью миграции УВ, что делает дальнейшие исследования в этой области перспективными для изучения возраста месторождений.

## **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Публикации в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях:**

1. Даутов О. Ш., Симахина Е. А. Длинноволновая электродинамическая модель оконтуривания углеводородной залежи с использованием обсадной колонны // Журнал Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2008. – Т. 50, № 2. – с. 33-36.

2. Даутов О. Ш., Симахина Е. А. Оценка отклика от углеводородной залежи с помощью методики расчёта диэлектрической антенны // Журнал Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2012. – №1. – с. 67-71.

**Доклады и тезисы в сборниках статей и материалов конференций:**

3. Гареев К. Р., Симахина Е. А. Электродинамическая модель системы «вертикальная электрическая линия – локальный электрод» // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы 34-ой сессии Международного семинара им.

Д. Г. Успенского. Москва, 29 января – 3 февраля 2007 г. – М.: ИФЗ РАН. 2007. – с. 71-73.

4. Гареев К. Р., Даутов О. Ш., Мухамадеев Р. С., Симахина Е. А., Хамидуллина Г. С. Моделирование электромагнитных частотных зондирований с помощью обсадной колонны при оконтуривании нефтяных месторождений // Изменяющаяся геологическая среда: пространственно-временные взаимодействия эндогенных и экзогенных процессов: Материалы Международной конференции Том 2: г. Казань; 13 – 16 ноября, 2007 г. / Сост. Н.Н.Равилова. – Казань: Изд-во Казанск. гос. ун-та, 2007. – с. 221.

5. Даутов О.Ш., Невзоров В.Н., Симахина Е.А., Майоров И.А. Численное моделирование результатов электроразведки в условиях техногенных помех // Информационные системы и технологии. ИСТ-2011: материалы междунар. научн.-техн. конф./ НГТУ. – Н.Новгород, 2011. – с.405-406.

6. Даутов О. Ш., Симахина Е. А. Модель наземно-скважинного электромагнитного зондирования // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы XXXVI сессии Международного семинара им. Д. Г. Успенского, 26 – 31 января 2009 г. / Сост. Н.Н. Равилова. – Казань: Изд-во Казан. гос. ун-та, 2009. – с. 280-283.

7. Даутов О. Ш., Симахина Е. А. Квазистационарная потенциальная модель электромагнитного зондирования с использованием обсадной колонны // Информационные технологии в науке, образовании и производстве: Материалы Всероссийской научной конференции. 30-31 мая 2007 г. – Казань: изд-во Казан. гос. техн. ун-та. – с. 439-443.

8. Даутов О. Ш., Симахина Е. А. Потенциальная модель возбуждения электромагнитного поля в слоистой среде // XV Туполевские чтения: Междунар. молодеж. науч. конф., 9-10 ноября 2007 г.: Материалы конфер. Том III. – Казань: Изд-во казан. гос. техн. ун-та, 2007. – с. 210-212.

9. Даутов О. Ш., Симахина Е. А. Современные информационные технологии геoeлектроразведки углеводородных ископаемых // Современные инфокоммуникационные технологии – основа инновационного развития: Материалы VII-ой ежегодной международной научно-практической конференции «Инфокоммуникационные технологии глобального информационного общества», Казань, 2009.

10. Даутов О. Ш., Симахина Е. А. Электродинамическая модель для низкочастотного наземно-скважинного зондирования // Информационно-измерительные, диагностические и управляющие системы. Диагностика – 2009: сб. материалов Междунар. науч.-техн. конф. Ч.2 / ред. кол.: В.Э. Дрейзин и др.; Курск. гос. техн. ун-т. Курск, 2009. – с. 150-152.

11. Симахина Е. А. Численный расчёт распределения поля в слоистой среде // XVI Туполевские чтения: Международная молодежная научная конференция, 28-29 мая 2008 г.: Труды конференции. Том III. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. 2008, с. 242-243.

12. Симахина Е. А. Модель зондирования слоистого геологического разреза // XVII Туполевские чтения: Международная молодежная научная конференция, 26-28 мая 2009 года: Материалы конференции. Том IV. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2009. – с. 254-256.

13. Симахина Е. А. Электрофизическая модель вертикальной миграции углеводородов // XVIII Туполевские чтения: Международная молодежная научная конференция: Труды конференции. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2010.

---

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Печ. л. 1,25. Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1,0.

Тираж 100. Заказ А77.

---

Типография КНИТУ-КАИ. 420111, Казань, К. Маркса, 10



102